ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Моделирование эффективного состава сорбентов для ремедиации нефтезагрязненных арктических побережий

Ж.В.Васильева[1,2]✉, **М.В.Васеха**[1,2], **Д.С.Колотова**[1], **Ю.А.Кучина**[1], **Г.И.Берестова**[1], **Д.В.Пуговкин**[1,3], **М.П.Венгер**[3]

[1] *Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*

[2] *Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия*

[3] *Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия*

Как цитировать эту статью: Васильева Ж.В., Васеха М.В., Колотова Д.С., Кучина Ю.А., Берестова Г.И., Пуговкин Д.В., Венгер М.П. Моделирование эффективного состава сорбентов для ремедиации нефтезагрязненных арктических побережий // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 35-47. EDN XNMKWH

Аннотация

В статье представлен научный подход к разработке и исследованию эффективности композитных сорбентов для ремедиации нефтезагрязненных почв арктических побережий. В качестве сорбционной основы использован хитин-хитозановый комплекс, полученный из отходов крабового производства. Источником нефтеокисляющих микроорганизмов, адаптированных к северным условиям, выступил активный ил – отход очистки сточных вод Мурманской обл. Представлены результаты исследований исходных материалов – сопоставительного спектрального анализа хитин-хитозанового комплекса, аналитического контроля содержания тяжелых металлов в активном иле и его микробиологического анализа. Разработка состава композитного сорбента выполнена на основе метода математического моделирования с применением ортогонального центрального композиционного планирования. В качестве варьируемого фактора принято содержание компонентов в составе сорбента, в качестве функции отклика – остаточное содержание нефтепродуктов в почве после ремедиации. Эксперименты проводились при температуре 10±2 °С, что соответствует среднесуточной температуре побережий Кольского полуострова в летний период. Полученные математические модели, устанавливающие зависимость эффективности действия сорбентов по остаточному содержанию нефтепродуктов в почве от соотношения компонентов, положены в основу выбора их оптимального состава. Для визуализации и сопоставления эффективности действия сорбентов различных составов построены трехмерные модели деградации нефтяного загрязнения. Правильность выбора оптимального состава сорбентов на основе математических моделей дополнительно подтверждена результатами фитотоксикологической оценки. Продемонстрирована высокая эффективность ремедиации нефтезагрязненных почв с помощью разработанного сорбента в сравнении с коммерческим аналогом. Установлено, что остаточное содержание нефтепродуктов в течение всего периода исследования в 2-4 раза ниже при использовании композитного сорбента. По итогам проведенных исследований предложены технологические основы производства композитного сорбента из отходов органического происхождения и его применения для эффективной очистки нефтезагрязненных побережий в арктических условиях.

Ключевые слова

разливы нефти и нефтепродуктов; сорбенты; хитин-хитозановый комплекс; активный ил; микроорганизмы; арктическое побережье; почвы; Арктика

Финансирование

Технологические основы получения и верификация эффективности композитного сорбента реализованы в рамках НИОКР МАУ № 124041100089-4, № 21050700058, моделирование состава сорбента, анализ данных и подготовка публикации выполнены в рамках Государственного задания № FMEZ-2025-0071, микробиологические исследования проведены в рамках Государственного задания ММБИ № 125013001157-6.

Поступила: 12.02.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 30.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

В соответствии с Планом развития Северного морского пути, основной прирост грузопотока по Северному морскому пути в ближайшие годы будет связан с морской перевозкой нефти в рамках проекта «Восток Ойл» компании «Роснефть»[1]. Ожидается многократное наращивание объемов

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 01.08.2022 № 2115-р «Об утверждении Плана развития Северного морского пути на период до 2035 года». URL: http://government.ru/docs/46171/ (дата обращения 12.02.2026).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ж.В.Васильева, М.В.Васеха, Д.С.Колотова, Ю.А.Кучина, Г.И.Берестова, Д.В.Пуговкин, М.П.Венгер, 2026

перевозки нефти как в западном, так и в восточном направлениях [1]. Ввод первого этапа проекта запланирован на 2026 г., а выход на полную проектную мощность 115 млн т/год – к 2033 г. [2]. Логистическая схема морской транспортировки нефти потребует строительства рейдовых перевалочных комплексов в акватории Кольского залива Мурманской обл. для перегрузки нефти с танкеров-челноков ледового класса на конвенционные танкеры для дальнейшей доставки потребителям. В настоящее время основной объем транспортировки арктической нефти связан с эксплуатацией месторождений Приразломное, Новый порт и Варандей, перевалка осуществляется в Кольском заливе Баренцева моря. На фоне устойчивого роста судоходства по Северному морскому пути объективно возрастает вероятность возникновения аварийных ситуаций, обусловленная сложными навигационными условиями региона [3].

Несмотря на комплекс реализуемых предупредительных мер, риск аварийных разливов нефти не может быть полностью исключен [4]. Среди возможных сценариев наибольшую экологическую опасность представляет разлив в прибрежной зоне, сопряженный с масштабным поражением уязвимых экосистем и затрудненностью ликвидации последствий [5].

Деградация попавших на арктическое побережье нефтепродуктов (НП) осуществляется значительно дольше ввиду недостатка естественного освещения, низких температур и низкой самоочищающей способности почв и водных объектов [6]. Это обусловливает необходимость разработки экономически целесообразных и экологически устойчивых технологий и материалов, способных обеспечивать эффективную ремедиацию нефтезагрязненных почв арктических побережий в суровых условиях Арктики [7].

Для ремедиации нефтезагрязненных почв побережий одним из приоритетных технологических решений является сорбционный метод. Специфика побережий, сочетая высокую экологическую ценность территории с повышенной уязвимостью перед нефтяным загрязнением, диктует особые требования к применяемым методам очистки. Они должны не только обеспечивать эффективное удаление нефтепродуктов, но и минимизировать риск вторичного загрязнения. Использование сорбентов позволяет локализовать и иммобилизовать нефтяные загрязнения, предотвращая их дальнейшую миграцию в сопряженные водные и наземные экосистемы [8].

По природе исходного сырья сорбентов выделяют три основные группы материалов – минеральные, органические и синтетические [9]. Минеральные сорбенты производятся на основе силикатов, алюмосиликатов, цеолитов, вермикулита, бентонита и характеризуются высокой удельной поверхностью и значительной сорбционной емкостью, что обеспечивает быстрое поглощение жидких углеводородов [10]. Достоинством таких материалов является относительно невысокая стоимость. К недостаткам относится отсутствие возможности сжигания и биодеградации; зачастую они опасны для дыхания и требуют использования средств индивидуальной защиты; их применение в северных экосистемах сопряжено с риском остаточного накопления инертных частиц в почве [11].

Синтетические сорбенты, производимые на основе соединений, полученных в результате химического синтеза, обладают высокой сорбционной емкостью, выраженной гидрофобностью и плавучестью, допускают многократное использование после механического отжима [12]. Такие сорбенты отличаются дороговизной и необходимостью последующего сбора, который весьма трудоемок и требует специальных средств. Синтетические сорбенты не подвергаются биологическому распаду, поэтому отработанные материалы требуют тщательной утилизации либо энергозатратной регенерации (сжигание) [13]. При избыточном использовании они способны стать источником вторичного загрязнения [14].

В этой связи особую актуальность приобретают биоразлагаемые сорбенты органического происхождения. Они не только эффективно аккумулируют НП, но и постепенно включаются в естественные биогеохимические циклы, не нарушая структуру и плодородие почвы. Их производят из возобновляемого биосырья – торфа, сапропеля, растительных остатков (опилок, соломы, кокосовой койры, лузги) и различных отходов органического происхождения (продуктов деревопереработки, зерновых и масличных агроотходов и др.) [15, 16]. Ключевыми преимуществами таких сорбентов выступают биоразлагаемость, исключающая вторичное загрязнение среды, и низкая себестоимость за счет использования отходов производства [17]. Они экологически безопасны для

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

почвенных и водных экосистем, утилизируются путем компостирования или биодеградации. Благодаря этому органические сорбенты широко применяют в ремедиации почв и водоемов, особенно на территориях с высокой экологической чувствительностью [18].

Ряд публикаций посвящен изучению влияния микроорганизмов на повышение скорости деградации нефтяных разливов. В исследовании [19] описаны наиболее эффективные методы и технологии применения микроорганизмов для ремедиации нефтезагрязненных почв в различных климатических условиях. В работе [20] выполнена оценка углеводородокисляющего потенциала психрофильных и психротолерантных микроорганизмов, выделенных из почв Ямало-Ненецкого автономного округа при температурах 5-15 °С, созданы микробные биопрепараты для ремедиации почв. Показано, что консорциум аборигенных микроорганизмов снижает концентрацию нефтепродуктов на 78,4 % за сезон при совместном использовании сорбентов и биостимуляторов. Положительная роль биостимуляторов, таких как гуматы, сидераты и минеральные удобрения, для биодеградации нефти в загрязненных почвах продемонстрирована авторами работы [21].

Перспективным направлением ремедиации нефтезагрязненных почв и прибрежных территорий является комбинированное применение органических биоразразлагаемых сорбентов и нефтеокисляющих микроорганизмов. Органические сорбенты в этом случае выполняют функцию носителя – быстро локализуют нефтяные загрязнения, снижают токсичность среды и создают структурно-пористую матрицу [22]. Нефтеокисляющие микроорганизмы катализируют биодеградацию углеводородов до нетоксичных соединений. Синергетический эффект заключается в комбинировании действия сорбента, который оперативно иммобилизует нефть, снижая ее миграцию в сопряженные экосистемы, и действия углеводородокисляющих микроорганизмов, которые обеспечивают долговременную очистку за счет биодеструкции загрязнителя. Такой подход сочетает преимущества физической сорбции и биологической ремедиации, позволяя эффективно восстанавливать нефтезагрязненные территории, в том числе экологически уязвимые прибрежные зоны [23].

Среди органических сорбентов особый интерес представляет хитозан – природный биополимер, обладающий биосовместимостью, биоразлагаемостью, нетоксичностью и высокими адсорбционными свойствами [24, 25]. Его сорбционная активность включает одинаковую способность связывать как гидрофильные, так и гидрофобные соединения [26]. Рядом авторов установлена высокая эффективность использования хитозана для сорбции нефтепродуктов из почв [27, 28].

Хитозан является N-деацетилированным производным хитина. В России в качестве массового источника хитинсодержащего сырья используются отходы переработки камчатского краба *Paralithodes camtschaticus,* объем которых только для Баренцевоморского бассейна составляет около 10 тыс. т ежегодно. Промышленное производство хитина и хитозана в России было организовано в 1970-1980 годах на предприятиях Мурманска и Владивостока [29]. Однако широкое применение хитозана в качестве сорбента нефти и нефтепродуктов ограничено его высокой стоимостью [30]. Технология его получения довольно трудоемка, ресурсо- и энергозатратна ввиду необходимости многостадийных операций удаления белковой и минеральной составляющих (депротеирования и деацетилирования) с использованием дорогостоящих реагентов [31]. В зависимости от степени деацетилирования коммерческая стоимость хитозана составляет от 80 до 200 тыс. руб./кг, что делает его использование в качестве нефтесорбента экономически нецелесообразным [24]. Хитин, предшественник хитозана, значительно дешевле его, но уступает в сорбционной емкости на 20-25 % из-за высокой кристалличности и плотной сети водородных связей [32].

В качестве экономически целесообразной альтернативы хитозану актуально рассмотрение промежуточного продукта переработки крабового сырья, получаемого по технологии с меньшим количеством стадий депротеинизации и деминерализации. Такой сорбент для ремедиации нефтезагрязненных почв ранее не рассматривался, публикации, посвященные этому вопросу, в отечественной и зарубежной литературе не найдены. Промежуточный продукт переработки крабового сырья в настоящем исследовании назван хитин-хитозановым комплексом (Хит). Предполагается, что он потенциально может обладать ключевыми преимуществами хитозана (сорбционной активностью, биоразлагаемостью, биосовместимостью) при существенно меньшей себестоимости, обеспечивать эффективную ремедиацию нефтезагрязненных побережий.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Перспективным источником нефтеокисляющих микроорганизмов представляется активный ил (АИ) – крупнотоннажный отход биологической очистки сточных вод. В его составе присутствуют ассоциации микроорганизмов, адаптированные к деградации органических соединений, включая углеводороды [33, 34]. Активный ил содержит консорциумы бактерий с выраженной нефтеокисляющей активностью, грибы и актиномицеты, дополняющие спектр биодеградирующих ферментов, компоненты внеклеточного матрикса, способствующие адгезии клеток к сорбенту [35, 36]. Ранее в литературе уже отмечалась потенциальная возможность использования активного ила в биоремедиации почв [37-39]. Предлагалась, в частности, технология с использованием смеси полимерный комплекс [хитозан – белок молочной сыворотки] – активный ил [40]. Применение активного ила обладает рядом преимуществ – низкой стоимостью отхода производства, высокой биологической активностью за счет природной адаптации к загрязнителям и температуре среды, структурной совместимостью с пористыми сорбентами (включая хитин-хитозановые комплексы).

Разработка сорбционных материалов, совмещающих эффективную сорбцию и микробиологическое окисление нефтяных загрязнений, представляет актуальную научно-практическую задачу современной экологической инженерии. Целью работы является разработка композитного сорбента на основе хитин-хитозанового комплекса и активного ила, оптимизация состава и экспериментальная оценка его эффективности для ремедиации нефтезагрязненных почв арктических побережий.

Методы

Почвенные пробы для серии экспериментов отбирали из прибрежной зоны Кольского залива, в местах, характеризующихся минимальным антропогенным воздействием. Отбор проводили из верхнего слоя почвы (глубина 0-10 см). В каждой точке отбора формировалась объединенная проба путем смешивания не менее пяти отдельных выборок, взятых по методу конверта на площади 10×10 м. Далее в лабораторных условиях из проб удаляли механические включения (камни, корни и неразложившиеся растительные остатки), высушивали пробы при комнатной температуре в затемненных условиях до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито и использовали для проведения серии экспериментов по моделированию искусственного нефтяного загрязнения. В качестве загрязнителя использовалась нефть марки ARCO плотностью 910 кг/м^3, с кинематической вязкостью 19,3 мм^2/с (при 20 °С), температурой застывания –30 °С и массовым содержанием серы и парафинов 2,3 и 1,8 % соответственно.

Основой композитного сорбента являлся хитин-хитозановый комплекс, полученный из карапакса камчатского краба по сокращенной технологии конверсии хитина с уменьшенным числом стадий обработки по сравнению с получением чистого хитозана, сниженным массовым соотношением сырья и реагентов на этапах депротеинизации и деминерализации. Полученный сорбент представляет собой белые хлопья с размером частиц 2-3 мм (рис.1). Общие затраты на производство хитин-хитозанового комплекса, полученного из отходов переработки краба камчатского по сокращенной технологии, составляют 0,95 тыс. руб./кг.



Рис.1. Хлопья хитин-хитозанового комплекса

Оценка состава полученного хитин-хитозанового комплекса была выполнена с помощью ИК-спектрального анализа сопоставлением с эталонным образцом хитозана производства Sigma-Aldrich со степенью деацетилирования не менее 75 %. Измерения выполнены с использованием инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ2202 (Инфраспек) с приставкой НПВО-Алмаз в диапазоне волновых чисел от 450 до 4000 см$^{-1}$, в режиме «пропускание» с числом сканирований 20.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ж.В.Васильева, М.В.Васеха, Д.С.Колотова, Ю.А.Кучина, Г.И.Берестова, Д.В.Пуговкин, М.П.Венгер, 2026

В качестве биоактивной компоненты композитного сорбента использовался избыточный активный ил, отобранный в результате биологической очистки канализационных очистных сооружений (КОС) пос. Мурмаши (Мурманская обл.) ГОУП «Мурманскводоканал». Отбор АИ производился при температуре сточных вод 7-9 °С. Перед использованием образцы декантировались до значения дозы ила по сухому веществу 15 $г_{св}$/л и илового индекса 110 $см^3$/г.

Оценка содержания тяжелых металлов в активном иле выполнялась согласно ПНД Ф 16.1:2.3:3.11 и ПНД Ф 16.1:2.23 с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой EXPEC PlaAr AES V (2023) и анализатора ртути РА-915М.

Численность, биомассу и морфологию бактериальных клеток активного ила определяли методом эпифлюоресцентной микроскопии с использованием ядерных фильтров с диаметром пор 0,22 мкм и флюорохрома DAPI при увеличении ×1000 [41]. Количество культивируемых сапротрофных и углеводородокисляющих бактерий (УОБ) определяли методом предельных разведений с использованием жидких питательных сред [42, 43]. При определении УОБ в качестве единственного источника углерода и энергии в среду добавляли стерилизованное дизельное топливо [44]. Оценку наличия патогенных микроорганизмов, в том числе сальмонелл, определяли на базе Испытательного лабораторного центра ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Мурманской области» согласно МУК 4.2.3695-21 «Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы».

Моделирование эффективного состава композитных сорбентов для ремедиации нефтезагрязненной почвы осуществлялось с помощью метода математического моделирования с применением ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) [45]. В качестве варьируемого фактора, подлежащего оптимизации, выступало содержание компонентов в составе сорбента, функция отклика – остаточное содержание нефтепродуктов в почве после ремедиации.

Базовые уровни и интервалы варьирования по массовым соотношениям компонентов в составе сорбента получены из серии предварительных опытов (табл.1).

Таблица 1

Базовые уровни и интервалы варьирования

Фактор	Уровень			Интервал
	–1	0	+1	
X_1 – содержание хитин-хитозанового комплекса, г/кг	3,0	3,7	4,4	0,7
X_2 – содержание суспензии активного ила, $г_{св}$/кг	1,4	2	2,6	0,6

В соответствии с матрицей планирования для двухфакторного эксперимента (табл.1) было проведено девять параллельных опытов с различными соотношениями хитин-хитозанового комплекса и активного ила в нефтезагрязненной почве. Эксперименты проводились при температуре 10±2 °С, что соответствует среднесуточной температуре побережий Кольского полуострова. Для каждого опыта образец предварительно подготовленной почвы массой 1,5 кг размещался в открытом пластиковом контейнере. К каждому образцу почвы при перемешивании приливали нефть до массового соотношения, равного 20 г нефти на 1 кг почвы. Продолжительность эксперимента составляла 56 сут. Выбор данной продолжительности эксперимента при температуре 10±2 °С обусловлен необходимостью моделировать условия арктического региона, где вегетационный период краток, а биодеградация нефти возможна только в ограниченное теплое время года.

Остаточное содержание нефтепродуктов в почве определялось флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02-3М» согласно ПНД Ф 16.1: 2.21-982 спустя 1, 7, 14, 28, 42 и 56 сут.

Фитотоксикологическая оценка эффективности использования разработанного сорбента для ремедиации нефтезагрязненных почв проводилась в соответствии с ФР 1.39.2006.02264[2]

[2] ФР. 1.39.2006.02264. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно-загрязненных почв М-П-2006.
URL: https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/295381 (дата обращения 12.02.2026).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и ГОСТ Р ИСО 22030-2009[3]. Данный метод основан на реакции растений на воздействие химических веществ, оказывающих влияние на ростовые и морфологические функции. Для проведения исследования были отобраны тестовые однодольная и двудольная культуры – овес посевной (*Avena sativa*) и редис посевной (*Raphanus sativus*). Сухие семена тест-культур были высажены в контейнеры, содержащие подготовленные почвенные образцы. В качестве контрольного образца использовалась нефтезагрязненная почва без внесения сорбентов. В качестве тест-функций отклика принимали показатели: высота проростка, мм; длина корня, мм; масса растения, г. Отбор проб для фитотестирования осуществлялся на 1-е, 7-е, 14-е, 21-е, 27-е, 42-е, 56-е сут эксперимента. Расчет фитотоксического эффекта торможения (фитотоксичности) проводился согласно ФР 1.39.2006.02264 по формуле

$$\text{ФЭ} = \left(1 - \frac{L_{\text{оп}}}{L_{\text{к}}}\right) \cdot 100\ \%,$$

где $L_{\text{оп}}$ – среднее значение тест-функции в опыте, мм; $L_{\text{к}}$ – среднее значение тест-функции в контроле, мм.

Обсуждение результатов

В рамках исследования осуществлена конверсия хитина из карапакса *Paralithodes camtschaticus* в хитин-хитозановый комплекс с целью повышения его сорбционных характеристик относительно чистого хитозана. ИК-спектральный анализ хитин-хитозанового комплекса, используемого в качестве основы композитного сорбента, показал (рис.2), что в образце, полученном по сокращенной технологии конверсии хитина, присутствуют полосы поглощения, характерные для хитина и хитозана. Выявлены амидные группы (1653 см$^{-1}$ для амида I и 1558 см$^{-1}$ для амида II), указывающие на наличие β1,4-связанного N-ацетил-D-глюкозамина (GlcNAc). Также отмечается полоса поглощения аминогрупп ($-NH_2$) при 1374 см$^{-1}$, типичная для хитозана. Однако, в отличие от эталонного хитозана Sigma, в образце, полученном из карапакса, отсутствует широкая полоса поглощения при 3295 см$^{-1}$, характерная для свободных ОН-групп, образующихся при деацетилировании, что свидетельствует о меньшей степени деацетилирования. Отсутствие широкой полосы при 3295 см$^{-1}$ может указывать на меньшую по сравнению с хитозаном гидрофильность и влиять на механизм сорбции. При этом в ИК-спектре разработанного сорбента наблюдается полоса поглощения при 1418 см$^{-1}$, которая в литературных данных связывается с деформационными колебаниями свободной О–Н-связи, не удаленной при кислотной обработке. Это указывает на сохранение некоторых функциональных групп, потенциально участвующих в сорбционных процессах. Наличие амидных и аминогрупп в полученном хитин-хитозановом комплексе предполагает способность к взаимодействию с нефтепродуктами [46].

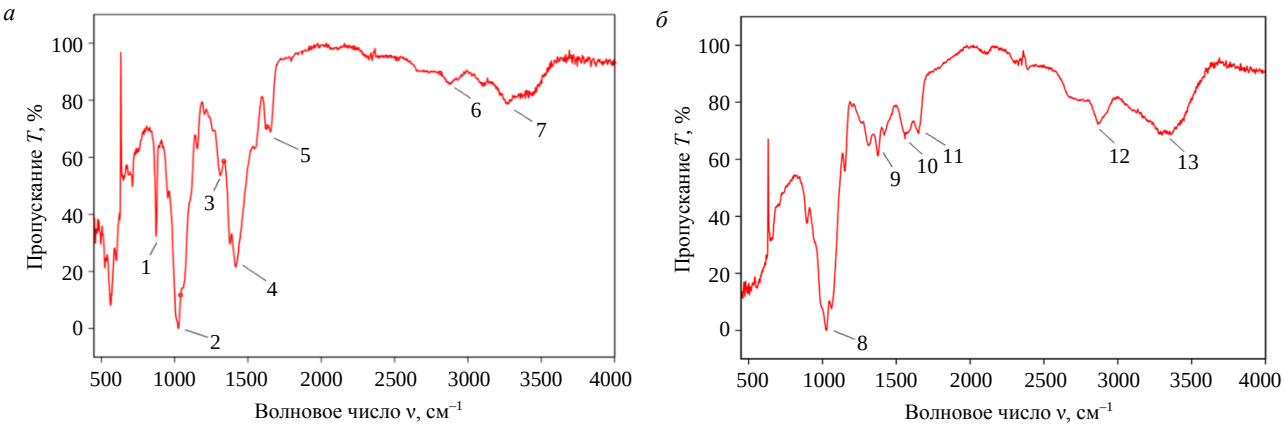


Рис.2. ИК-спектры полученного хитин-хитозанового комплекса (*а*) и стандартного образца хитозана Sigma (*б*)

1 – 873; 2 – 1024; 3 – 1374; 4 – 1418; 5 – 1653 и 1558; 6 – 2880; 7 – 3449-3356; 8 – 1027; 9 – 1374; 10 – 1558; 11 – 1653; 12 – 2878; 13 – 3393-3297 см$^{-1}$

[3] ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На основании полученных данных можно сделать вывод, что синтезированный хитин-хитозановый комплекс является промежуточным продуктом трансформации хитина в хитозан. Наличие амидных, амино- и частично сохраненных гидроксильных групп обусловливает его потенциал как сорбента для нефтепродуктов.

При обосновании применения активного ила как компонента композитного сорбента для рекультивации нефтезагрязненных побережий учитывались нормативные требования ГОСТ Р 54534-2011. Стандарт классифицирует активный ил как осадок обработки сточных вод и устанавливает ограничения на содержание в нем тяжелых металлов с целью исключения их миграции в ремедиационную почву. Проведенный аналитический контроль содержания тяжелых металлов в образце АИ (табл.2) демонстрирует, что фактические концентрации тяжелых металлов в нем значительно меньше установленных нормативов.

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в активном иле

Определяемый показатель	Требования ГОСТ Р 54534-2011	Результаты измерений	Методика
Цинк, мг/кг	3500	370±70	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11
Никель, мг/кг	400	130±50	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11
Медь, мг/кг	750	103±21	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11
Мышьяк, мг/кг	20	0,8±0,4	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11
Кадмий, мг/кг	30	1,6±0,8	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11
Свинец, мг/кг	500	10,9±2,7	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11
Хром, мг/кг	1000	42±8	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11
Ртуть, мкг/кг	15	5,4±2,1	ПНД Ф 16.1:2.23

Необходимо иметь в виду, что в настоящем исследовании активный ил рассматривается не как почвогрунт (для которого ГОСТ Р 54534-2011 регламентирует и другие показатели), а исключительно как источник активной микробной биомассы. Это смещение функциональной роли обосновывает неактуальность ряда показателей, установленных стандартом для почвогрунтов, и позволяет переместить фокус исследования на биоактивный потенциал микроорганизмов активного ила. Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемый АИ соответствует экологическим требованиям по содержанию тяжелых металлов, не вносит дополнительное загрязнение в нефтезагрязненную почву и может быть использован в качестве ремедианта при рекультивации побережий.

Микробиологические исследования показали, что общая численность бактерий (ОЧБ) в активном иле составила $1{,}98\times10^8$ клеток/мл (рис.3). Бактериальная биомасса достигала 10900 (10888) мг/м^3. Численность культивируемых сапротрофных бактерий составляла 17 млн клеток/мл. В ходе исследований также обнаружены микроорганизмы, способные использовать нефтяные углеводороды в качестве единственного источника углерода и энергии. Их количество составило 2,5 тыс. клеток/мл (рис.3). Сообщество бактерий активного ила массово представлено крупными клетками длиной 1,0-2,5 мкм. Средний объем бактериальных клеток в АИ достигал 0,055 мкм^3.

Согласно литературным данным, численность микроорганизмов в АИ может быть различной и зависит от условий, в которых применяется ил. Количество бактерий, по различным данным, может составлять от десятков тысяч до миллиардов клеток в 1 мл ила [47-49]. В нашем случае общая численность бактерий в 1 мл ила достигала сотен миллионов клеток. Это соответствует максимальным значениям, полученным Эвертом и Пайнтером [48] при работе с бактериофагами в активных илах. Наличие бактерий, способных окислять нефтяные углеводороды, позволяет предположить потенциальную возможность использования активного ила для очистки грунтов и почв от нефтяного загрязнения.

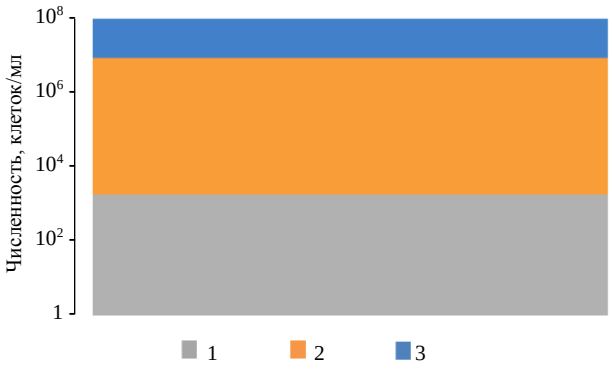


Рис.3. Общая численность бактерий, количество культивируемых сапротрофных и углеводородокисляющих бактерий в активном иле
1 – УОБ; 2 – сапротрофы; 3 – ОЧБ

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Дополнительно проведенная оценка микробиологической безопасности подтвердила отсутствие патогенных микроорганизмов в составе активного ила, что означает безопасность его применения для рекультивации побережий.

Таким образом, результаты микробиологического анализа подтвердили перспективность применения активного ила как источника углеводородокисляющих микроорганизмов в составе композитного сорбента для ремедиации нефтезагрязненных почв.

Дальнейшее исследование было направлено на моделирование и выявление эффективного состава композитного сорбента на основе хитин-хитозанового комплекса и активного ила в соответствии с принятым ОЦКП. План и результаты реализации эксперимента представлены в табл.3.

Таблица 3

Результаты моделирования состава сорбента на основе хитин-хитозанового комплекса и активного ила

Номер опыта	План эксперимента				Функция отклика (период ремедиации)						
	Содержание хитин-хитозанового комплекса		Содержание активного ила		Содержание НП в образцах почв *Z*, мг/г						
	По матрице, *X*	В натуральном выражении, г/кг	По матрице, *Y*	В натуральном выражении, г/кг	1-е сут	7-е сут	14-е сут	21-е сут	27-е сут	42-е сут	56-е сут
1	–1	3,0	–1	1,4	5,734	1,528	1,439	1,127	1,061	1,056	1,045
2	0	3,7	–1	1,4	5,504	1,354	1,001	0,926	0,913	0,915	0,908
3	+1	4,4	–1	1,4	3,475	1,324	0,794	0,661	0,683	0,653	0,640
4	–1	3,0	0	2,0	3,465	0,842	0,611	0,454	0,448	0,449	0,444
5	0	3,7	0	2,0	2,854	0,780	0,516	0,434	0,412	0,431	0,416
6	+1	4,4	0	2,0	2,796	0,683	0,522	0,386	0,350	0,334	0,319
7	–1	3,0	+1	2,6	4,736	1,635	1,468	0,984	0,885	0,848	0,838
8	0	3,7	+1	2,6	2,690	1,222	1,214	0,949	0,85	0,796	0,779
9	+1	4,4	+1	2,6	2,457	0,925	0,864	0,761	0,693	0,674	0,661

По результатам эксперимента (табл.3) получены уравнения регрессий для каждого периода ремедиации, характеризующие зависимость остаточного содержания НП в образцах почв (*Y*) от массового соотношения хитин-хитозанового комплекса и суспензии активного ила,

$$Z_1 = 24{,}587 - 2{,}6431X - 13{,}0865Y + 0{,}1929X^2 - 0{,}0119XY + 2{,}9472Y^2;$$

$$Z_7 = 6{,}997 - 0{,}2194X - 5{,}2589Y + 0{,}0765X^2 - 0{,}3012XY + 1{,}5639Y^2;$$

$$Z_{14} = 9{,}2565 - 0{,}9614X - 6{,}4518Y + 0{,}0803X^2 + 0{,}0244XY + 1{,}612Y^2;$$

$$Z_{21} = 6{,}3557 + 0{,}1471X - 5{,}837Y - 0{,}0833X^2 + 0{,}1446XY + 1{,}3241Y^2;$$

$$Z_{27} = 5{,}8281 + 0{,}1984X - 5{,}4084Y - 0{,}0782X^2 + 0{,}1107XY + 1{,}2338Y^2;$$

$$Z_{42} = 5{,}6213 + 0{,}2422X - 5{,}2449Y - 0{,}0918X^2 + 0{,}1363XY + 1{,}1639Y^2;$$

$$Z_{56} = 5{,}6716 + 0{,}2121X - 5{,}2433Y - 0{,}0881X^2 + 0{,}1357XY + 1{,}1634Y^2.$$

Визуализация уравнений регрессии с помощью программы Statistica 14.0 позволила получить 3D-модели процесса ремедиации нефтезагрязненной почвы за каждый отрезок времени. На рис.4 представлена 3D-модель для периода ремедиации 56 сут, на которой можно выделить область оптимального сочетания варьируемых факторов (содержание хитин-хитозанового комплекса и активного ила), приводящих к наименьшему остаточному содержанию нефтепродуктов в почве. Разброс оптимальных сочетаний варьируемых факторов на моделях для всего периода проведения эксперимента колеблется в диапазонах – 4,2-4,4 г/кг хитин-хитозанового комплекса и 1,9-2,2 г/кг активного ила. Экстремум математической модели для периода ремедиации 56 сут соответствует точке с соотношением показателей варьируемых факторов X_1 = 4,3 г/кг; X_2 = 2,0 г/кг.

Эффективность применения композитного сорбента подтверждена с помощью фитотестирования, в котором участвовали образцы почв с соотношением компонентов согласно плану эксперимента (табл.3). Результаты фитотоксикологической оценки эффективности использования композитного сорбента представлены в отношении однодольной тест-культуры овса посевного (рис.5).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ж.В.Васильева, М.В.Васеха, Д.С.Колотова, Ю.А.Кучина, Г.И.Берестова, Д.В.Пуговкин, М.П.Венгер, 2026

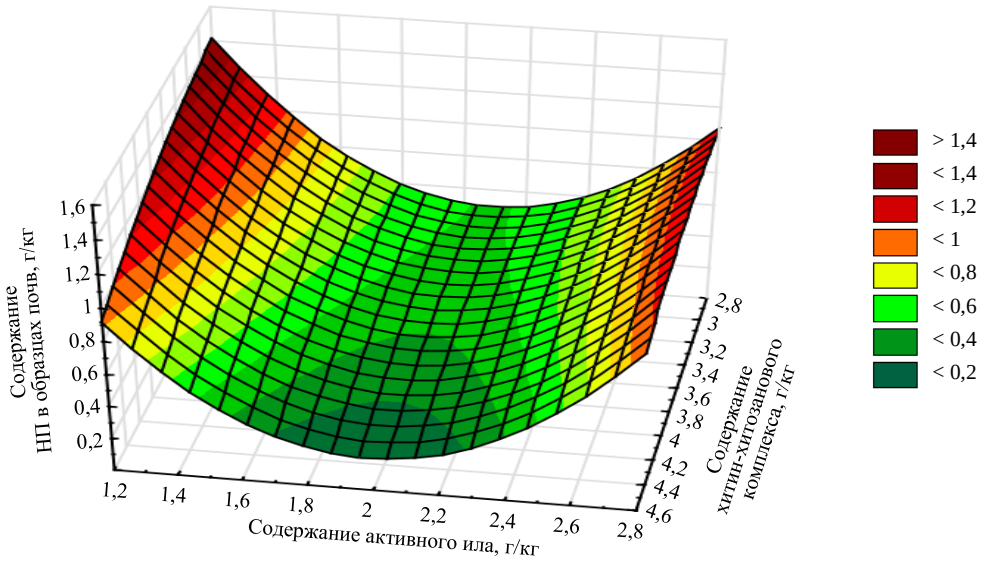


Рис.4. Модель процесса сорбции нефтепродуктов в почве на 56-е сут при температуре 10 °С

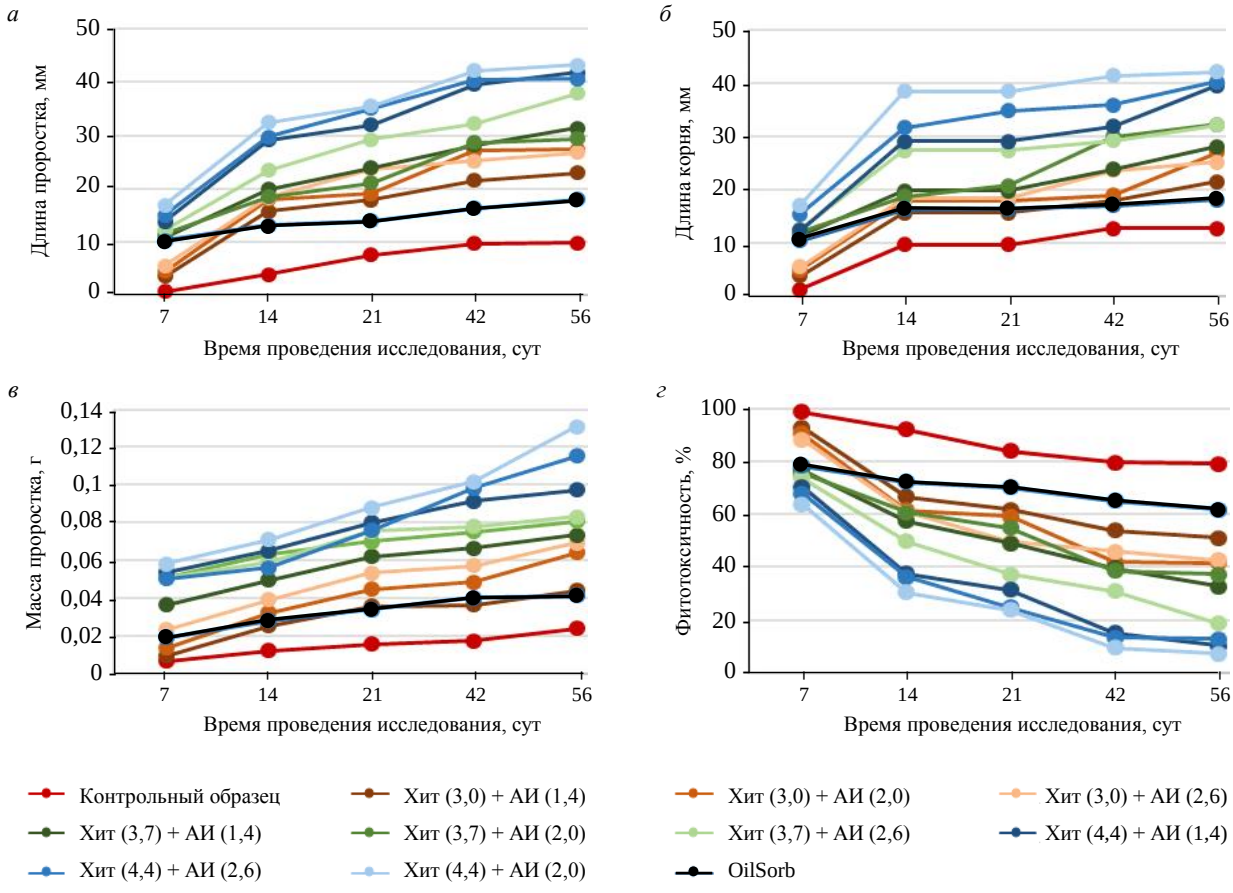


Рис.5. Динамика показателей тест-функций: длина проростка (*а*); длина корня (*б*); масса проростка (*в*) и фитотоксический эффект (*г*)

Величины тест-функций «длина проростка», «длина корня» и «масса проростка» тест-культуры показали существенный рост в первые 14 сут эксперимента и снижение динамики роста в последующий период. Наиболее низкие показатели тест-функций, отражающие состояние почвы в период ремедиации, отмечены для контрольного образца нефтезагрязненной почвы без добавления сорбентов. Наилучшие показатели тест-функций установлены для образца с соотношением компонентов – 4,4 г хитин-хитозанового комплекса и 2,0 $г_{св}$ – активного ила на 1 кг почвы. Величины

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ж.В.Васильева, М.В.Васеха, Д.С.Колотова, Ю.А.Кучина, Г.И.Берестова, Д.В.Пуговкин, М.П.Венгер, 2026

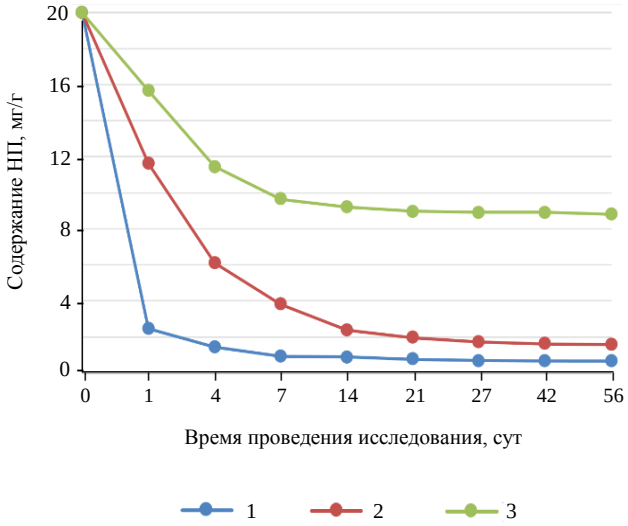


Рис.6. Динамика снижения содержания нефтепродуктов в ремедиируемой почве при использовании разработанного и промышленного сорбентов

1 – Хит (4,4) + АИ (2,3); 2 – OilSorb; 3 – контрольный образец

тест-функций промышленного сорбента OilSorb в течение 7 и 14 сут эксперимента были релевантны значениям разрабатываемого сорбента, но после 21-х сут и далее демонстрировали меньшую динамику роста, что свидетельствует о меньшей эффективности OilSorb для ремедиации нефтезагрязненных почв в сопоставлении со всеми комбинациями компонентов композитного сорбента.

Указанные зависимости получили подтверждение при оценке показателя «фитотоксичность» ремедиируемых почв. Наибольшие показатели фитотоксичности демонстрировали контрольный образец и образец с сорбентом OilSorb, наименьшую фитотоксичность показал образец сорбента № 6 с соотношением 4,4 г хитин-хитозанового комплекса и 2,0 $г_{св}$ активного ила на 1 кг почвы. Данное соотношение компонентов сорбента является максимально близким к установленному с помощью математической модели оптимуму компонентов.

Для оценки установленного с помощью математической модели оптимального соотношения компонентов сорбента (4,3 г хитин-хитозанового комплекса и 2,0 $г_{св}$ активного ила на 1 кг почвы) было проведено сравнение эффективности его применения для ремедиации нефтезагрязненных почв с промышленным сорбентом OilSorb, используемым береговыми службами реагирования на авариные разливы нефти (рис.6).

Уменьшение остаточного содержания НП в почве без добавления сорбентов за 1-е сут эксперимента составило 21,6 %, что связано с первым этапом деградации нефтепродуктов, обусловленным физико-химическим выветриванием, в результате которого из почвы удаляются газообразные и легколетучие компоненты нефти (рис.6). Уменьшение остаточного содержания НП за первый день в почве с промышленным сорбентом OilSorb составило 41,8 %, при этом вклад сорбента в этом значении составляет 20,2 % (равен разности между 41,8 и 21,6 %). В образце нефтезагрязненной почвы с композитным сорбентом за первые сутки снижение содержания НП составило 87,5 %, при этом вклад сорбента в этом значении составляет 65,9 % (равен разности между 87,5 и 21,6 %). Такое резкое снижение содержания НП за столь короткий срок можно объяснить синергетическим действием сорбционного материала и микроорганизмов.

Начиная с 7-х сут в образце почвы без внесения сорбентов (контрольный образец) динамика содержания НП практически не менялась до окончания эксперимента, в отличие от двух других образцов, что говорит о затухании процесса самоочищения почвы.

Эффективность разработанного сорбента в течение всех последующих контрольных точек оставалась более высокой, чем в других модельных образцах. К 56-м сут исследования остаточное содержание нефти в образце с композитным сорбентом уменьшилось на 96,7 %, при этом остаточное содержание НП было в 2-4 раза ниже, чем в случае с OilSorb.

Заключение

Представлен научный подход к разработке композитного сорбента для ремедиации нефтезагрязненных почв арктических побережий.

Основой сорбента является хитин-хитозановый комплекс, получаемый по сокращенной, экономически обоснованной технологии конверсии хитина. С помощью ИК-спектрального анализа хитин-хитозанового комплекса установлено наличие в нем функциональных групп, присущих как хитину, так и хитозану, что говорит о промежуточном характере исследуемого продукта и свидетельствует о его потенциальной эффективности в качестве сорбента нефтепродуктов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Источником нефтеокисляющих микроорганизмов, адаптированных к северным условиям, является активный ил – отход биологических сооружений КОС Мурманской обл., в котором численность углеводородокисляющих бактерий, способных использовать компоненты нефти в качестве единственного источника углерода и энергии, составляет 2,5 тыс. клеток/мл. Подтверждено соответствие активного ила экологическим нормативам содержания тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов, что исключает риск вторичного загрязнения почв при применении сорбента.

Экспериментальное обоснование оптимального соотношения хитин-хитозанового комплекса и активного ила проведено в рамках методологии математического планирования эксперимента с использованием ортогонального центрального композиционного планирования как ключевого инструмента оптимизации. Получены регрессионные зависимости, количественно описывающие динамику снижения концентрации нефтепродуктов в почве при температуре 10±2 °С. Визуализация полученных уравнений в трехмерной системе координат позволила установить, что при оптимальных массовых соотношениях хитин-хитозановой основы и активного ила, равных 4,3 и 2,0 г/кг соответственно, обеспечивается минимальное остаточное содержание нефтепродуктов в почве.

Эффективность разработанного сорбента верифицирована следующими методами. Фитотоксикологическая оценка подтвердила адекватность математической оптимизации состава сорбентов для ликвидации нефтяных загрязнений арктических побережий. Сравнительные испытания эффективности ремедиации нефтезагрязненных почв в отношении композитного сорбента с оптимальным содержанием компонентов и промышленного сорбента OilSorb подтвердили преимущество разработанного состава. В ходе эксперимента установлено, что остаточное содержание нефтепродуктов при применении композитного сорбента в 2-4 раза ниже в течение всего периода наблюдений за процессом ремедиации.

Таким образом, на основе проведенных исследований предложены технологические основы производства эффективного композитного сорбента из хитин-хитозанового комплекса и активного ила с оптимальным соотношением компонентов для ремедиации нефтезагрязненных побережий в арктических условиях. Полученные результаты открывают возможности для масштабирования технологии и ее внедрения в практику ликвидации разливов нефти в условиях Арктики, сочетая экологичность с экономической рентабельностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Григорьев М.Н.* Создание новой логистики экспорта арктических минеральных ресурсов как условие их устойчивого освоения // Георесурсы. 2023. Т. 25. № 2. С. 36-46. DOI: 10.18599/grs.2023.2.3

2. *Козьменко А.С.* Развитие нефтегазового проекта «Восток Ойл» в современных условиях // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2024. № 3 (147). С. 125-130.

3. *Спиридонов А.А., Фадеев А.М.* Стратегическое управление рисками освоения арктических шельфовых месторождений // Экономика промышленности. 2022. Т. 15. № 1. С. 36-48. DOI: 10.17073/2072-1633-2022-1-36-48

4. *Zhaoyang Yang, Zhi Chen, Kenneth Lee et al.* Decision support tools for oil spill response (OSR-DSTs): Approaches, challenges, and future research perspectives // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 167. № 112313. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112313

5. *Патин С.А.* Нефтяные разливы и их воздействия на морскую среду и биоресурсы. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 2008. 508 с.

6. *Zaman Sajid, Faisal Khan, Brian Veitch.* Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 153. № 111001. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111001

7. *Wilkinson J., Beegle-Krause C.J., Evers K.-U. et al.* Oil spill response capabilities and technologies for ice-covered Arctic marine waters: A review of recent developments and established practices // Ambio. 2017. Vol. 46. Iss. 3 (Suppl.). P. 423-441. DOI: 10.1007/s13280-017-0958-y

8. *Васильева Г.К., Михедова Е.Е., Стрижакова Е.Р., Ахметов Л.И.* Разработка метода сорбционной биоремедиации нефтезагрязненных минеральных почв Северо-Западной Сибири на примере подзола иллювиально-железистого // Biologia et Biotechnologia. 2024. № 1. № 3. DOI: 10.61847/pbcras.bbt.2024.1.3

9. *Васильева Ж.В. Тришина А.С.* Банк данных сорбентов для использования при реагировании на разливы нефти и нефтепродуктов в условиях Арктического региона. Мурманск: Мурманский арктический университет, 2025. 36 с.

10. *Канивец А.В.* Применение минеральных сорбентов в очистке загрязнений нефтью (обзор) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2024. № 21. С. 110-117. DOI: 10.31241/FNS.2024.21.014

11. *Шачнева Е.Ю.* Получение сорбентов на основе природного минерального сырья // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2022. № 2. С. 66-74. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-2-66-74

12. *Байбурдов Т.А., Шмаков С.Л.* Полимерные сорбенты для сбора нефтепродуктов с поверхности водоемов: обзор англоязычной литературы за 2000-2017 гг. (часть 2) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18. Вып. 2. С. 145-153. DOI: 10.18500/1816-9775-2018-18-2-145-153

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. *Bhardwaj N., Bhaskarwar A.N.* A review on sorbent devices for oil-spill control // Environmental Pollution. 2018. Vol. 243. Part B. P. 1758-1771. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.09.141

14. *Лысак И.А., Лысак Г.В.* Гидрофобные сорбенты на основе ультратонких полимерных волокон для улавливания нефтепродуктов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 12. С. 143-151. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4311

15. *Abu T.O., Zubairu A., Achepa O.V.* Biomass-based Sorbents for Oil spill Clean-up: A review // Malaysian Journal of Catalysis. 2025. Vol. 9. № 1. P. 1-15. DOI: 10.11113/mjcat.v9n1.192

16. *Дубинов Ю.С., Прыгаев А.К., Помылка И.О., Анашкин Н.В.* Технология изготовления сорбента для ликвидации разливов нефти и маркеров нефти из борщевика Сосновского // Инженер-нефтяник. 2022. № 2. С. 55-59.

17. *Гибадуллина Н.Н., Бадамшин А.Г., Сунагатова Э.М., Губа А.С.* Экологически безопасный сорбент для ликвидации последствий разлива нефти // Химическая безопасность. 2023. Т. 7. № 1. С. 103-115. DOI: 10.25514/CHS.2023.1.24008

18. *Naja I.A., Bhawani S.A., Bhat A.H. et al*. Biodegradable Waste Sorbents for Oil Spill Treatment // Biobased Materials and Their Composites for Oil Spill Treatment. Springer, 2025. P. 77-90. DOI: 10.1007/978-981-96-6049-0_5

19. *Созина И.Д., Данилов А.С.* Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297-312. DOI: 10.31897/PMI.2023.8

20. *Лунькин Д.А.* Биоремедиация нефтезагрязненных почв арктического региона: потенциал психрофильной микробиоты и эффективность инновационных биотехнологий // Наука.Мысль. 2023. Т. 13, № 1. С. 5-19. DOI 10.25726/m8659-6702-2117-m

21. *Гречищева Н.Ю., Запорожская А.А., Алтанбагана Н.* Оценка самоочищающейся способности нефтезагрязненных почв северных регионов // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2023. Т. 66. № 10. С. 114-120. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.6770

22. *Zamparas M., Tzivras D., Dracopoulos V., Ioannides T.* Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review // Molecules. 2020. Vol. 25. Iss. 19. № 4522. DOI: 10.3390/molecules25194522

23. *Шубаков А.А., Романов Г.Г., Юркина Е.В. и др.* Способность углеводородокисляющих дрожжей разлагать в торфяном сорбенте товарную нефть в высоких концентрациях // Бутлеровские сообщения. 2024. Т. 77. № 1. С. 107-115.

24. *Kumar M.N.V.R.* A review of chitin and chitosan applications // Reactive and Functional Polymers. 2000. Vol. 46. Iss. 1. P. 1-27. DOI: 10.1016/S1381-5148(00)00038-9

25. *Камская В.Е.* Хитозан: структура, свойства и использование // Научное обозрение. Биологические науки. 2016. № 6. С. 36-42.

26. *Bidgoli H., Khodadadi A.A., Mortazavi Y.* A hydrophobic/oleophilic chitosan-based sorbent: Toward an effective oil spill remediation technology // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. Vol. 7. Iss. 5. № 103340. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103340

27. *Escudero-Oñate C., Martínez-Francés E.* A Review of Chitosan-Based Materials for the Removal of Organic Pollution from Water and Bioaugmentation // Chitin-Chitosan. Myriad Functionalities in Science and Technology. IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.76540

28. *Khan A., Ali N., Malik S. et al.* Chitosan-based green sorbents for toxic cations removal // Sorbents Materials for Controlling Environmental Pollution. Elsevier, 2021. P. 323-352. DOI: 10.1016/B978-0-12-820042-1.00014-6

29. *Новиков В.Ю., Коновалова И.Н., Долгопятова Н.В.* Химические основы технологии получения хитина и его производных из панциря ракообразных. СПб: ГИОРД, 2012. 208 с.

30. *Lehocký M.* Environmental Applications of Chitosan Derivatives and Chitosan Composites // Polymers. 2025. Vol. 17. Iss. 19. № 2583. DOI: 10.3390/polym17192583

31. *Строкова Н.Г., Подкорытова А.В.* Современные способы переработки хитинсодержащего сырья // Труды ВНИРО. 2018. Т. 170. С. 124-152.

32. *Younes I., Rinaudo M.* Chitin and Chitosan Preparation from Marine Sources. Structure, Properties and Applications // Marine Drugs. 2015. Vol. 13. Iss. 3. P. 1133-1174. DOI: 10.3390/md13031133

33. *Пономарева А.Л.* Повышение эффективности очистки нефтесодержащих сточных вод при помощи нефтеокисляющих микроорганизмов: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2017. 22 с.

34. *Ravi A., Ravuri M., Krishnan R. et al.* Characterization of petroleum degrading bacteria and its optimization conditions on effective utilization of petroleum hydrocarbons // Microbiological Research. 2022. Vol. 265. № 127184. DOI: 10.1016/j.micres.2022.127184

35. *Yasuda S., Suenaga T., Orschler L. et al.* Metagenomic Insights Into Functional and Taxonomic Compositions of an Activated Sludge Microbial Community Treating Leachate of a Completed Landfill: A Pathway-Based Analysis // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. № 640848. DOI: 10.3389/fmicb.2021.640848

36. *Колотова О.В., Могилевская И.В., Владимцева И.В*. Выделение, отбор и применение углеводородокисляющих микроорганизмов для очистки сточных вод и нефтезагрязненных грунтов// Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Вып. 1. С. 79-92. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-79-92

37. *Рудакова Л.В., Белик Е.С.* Обоснование возможности использования карбонизата избыточного активного ила в качестве биосорбента, применяемого в технологии биоремедиации нефтезагрязненных почв // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 21. С. 330-332.

38. *Kayode-Isola T.M., Adebisi O.O., Obuekwe I.S.* Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil Using Activated Sludge Derived from Vitellaria Paradoxa Seed Wastewater // Journal of Advances in Microbiology. 2025. Vol. 25. Iss. 3. P. 13-31. DOI: 10.9734/jamb/2025/v25i3904

39. *Васильева Ж.В., Горбовская Т.Д., Павлов А.В.* Рекультивация нефтезагрязненных почв с использованием органических отходов в условиях Кольского Севера // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22. № 1. С. 72-82. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-72-82

40. *Иощенко Ю.П., Каблов В.Ф., Заиков Т.Е.* Биодеградация нефтепродуктов в загрязненной почве с использованием смеси полимерный комплекс [хитозан-белок молочной сыворотки]-активный ил // Пластические массы. 2008. № 7. С. 50-53.

41. *Porter K.G., Feig Y.S.* The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora // Limnology and Oceanography. 1980. Vol. 25. Iss. 5. P. 943-948. DOI: 10.4319/lo.1980.25.5.0943

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

42. *Aaronson Sh.* Experimental Microbial Ecology. Academic Press, 1970. 236 p.

43. *Mills A.L., Breuil C., Colwell R.R.* Enumeration of petroleum-degrading marine and estuarine microorganisms by the most probable number method // Canadian Journal of Microbiology. 1978. Vol. 24. № 5. P. 552-557. DOI: 10.1139/m78-089

44. *Коронелли Т.В., Ильинский В.В.* Об учете численности углеводородокисляющих бактерий в морской воде методом предельных разведений // Вестник МГУ. Серия 16: Биология. 1984. № 3. С. 54-56.

45. *Адлер Ю.П., Грановский Ю.В.* Методология и практика планирования эксперимента в России. М.: Изд. дом МИСиС, 2016. 182 с.

46. *Ситников П.А., Удоратина Е.В., Легкий Ф.В. и др.* Формирование эмульсий типа «нефть-в-воде», стабилизированных нанокристаллами хитина // Бутлеровские сообщения. 2023. Т. 76. № 11. С. 94-106.

47. *Ewert D.L., Paynter M.J.B.* Enumeration of Bacteriophages and Host Bacteria in Sewage and the Activated-Sludge Treatment Process // Applied and Environmental Microbiology. 1980. Vol. 39. № 3. P. 576-583. DOI: 10.1128/aem.39.3.576-583.1980

48. *Vollertsen J.E.S., Jahn A., Nielsen, J.L. et al.* Comparison of methods for determination of microbial biomass in wastewater // Water Research. 2001. Vol. 35. Iss. 7. P. 1649-1658. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00450-4

49. *Foladori P., Bruni L., Tamburini S., Ziglio G.* Direct quantification of bacterial biomass in influent, effluent and activated sludge of wastewater treatment plants by using flow cytometry // Water Research. 2010. Vol. 44. Iss. 13. P. 3807-3818. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.027

***Авторы*: Жанна Вячеславовна Васильева,** *канд. техн. наук, заведующий кафедрой* (*Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*), *старший научный сотрудник* (*Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия*), *kuchugura@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2254-1452*, **Михаил Викторович Васеха,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой* (*Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*), *ведущий научный сотрудник* (*Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-0672-5662*, **Дарья Сергеевна Колотова,** *канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник* (*Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-1700-2323*, **Юлия Анатольевна Кучина,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-3419-1442*, **Галина Ивановна Берестова,** *канд. техн. наук, доцент* (*Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*), *https://orcid.org/0009-0000-5134-2981*, **Дмитрий Витальевич Пуговкин,** *канд. биол. наук, доцент* (*Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*), *старший научный сотрудник* (*Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-4614-4969*, **Марина Павловна Венгер,** *научный сотрудник* (*Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-4433-8965*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0